

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ ГРУНТОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Г.А. Иовлев¹, Н.С. Пискунов¹, Е.Д. Бахвалов¹, В.И. Очкуров¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: jenbah@yandex.ru

Аннотация: Спрос на качественный анализ физико-механических параметров грунта возрастает в связи с повышением сложности строительства и необходимостью использования нелинейных моделей для моделирования грунтового массива. Представлены результаты обработки инженерно-геологических изысканий, выполненных для территории Санкт-Петербурга. Рассматриваются методики по определению индекса качества образцов грунта и проводится оценка влияния качества образцов на их физико-механические параметры. Рассматриваются и сравниваются различные методики определения коэффициентов переуплотнения грунта, формирования природного напряженного состояния массива. Выполняется оценка влияния нарушенности структуры образца на объемную жесткость, принимаемую для нелинейных грунтовых моделей. Проводится корректировка компрессионной кривой двумя графическими методами с последующим сравнением их влияния на начальные геомеханические параметры. На базе выполненного анализа предложена методика определения и оптимизации входных параметров для моделей упрочняющегося грунта с использованием геотехнического программного комплекса PLAXIS. Описывается степень нарушенности образцов грунта для геотехнических условий Санкт-Петербурга, а также влияние различных параметров на результаты калибровки и степень сходимости с лабораторными данными.

Ключевые слова: коэффициент переуплотнения, нелинейные модели, грунтовый массив, Plaxis, SoilTest, трехосные испытания, компрессионные испытания, модель упрочняющегося грунта, численное моделирование.

Для цитирования: Иовлев Г. А., Пискунов Н. С., Бахвалов Е. Д., Очкуров В. И. Методы оптимизации параметров нелинейных грунтовых моделей для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 148–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_148.

Optimizing nonlinear soil body models for geotechnical conditions of Saint-Petersburg

G.A. Iovlev¹, N.S. Piscunov¹, E.D. Bahvalov¹, V.I. Ochukurov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: jenbah@yandex.ru

Abstract: The quality analysis of physical and mechanical parameters of soil body acquires increasingly higher topicality as complexity of construction engineering grows and it is required to carry out nonlinear modeling of soil mass. This study addresses the site survey data obtained

in the territory of Saint-Petersburg. The procedures to determine quality index of soil samples are discussed, the influence of quality of samples on their physical and mechanical parameters is assessed. The procedures for determining overconsolidation factor and natural stress state formation in soil mass are compared. The influence of structural discontinuity of test samples on their volumetric stiffness assumed in nonlinear soil body models is estimated. The consolidation test curve is corrected using two graphical methods, and the influences of these methods on initial geomechanical parameters are compared. Based on the performed analysis, the procedure is proposed for the determination and optimization of input parameters for modeling consolidating soil bodies using geotechnical engineering simulation PLAXIS. The quality of soil mass in the area of Saint-Petersburg is described, and the impact of different parameters on the model calibration and its agreement with the lab-scale test data is discussed.

Key words: overconsolidation factor, nonlinear models, soil mass, Plaxis, SoilTest, triaxial testing, compression testing, consolidating soil body model, numerical modeling.

For citation: Iovlev G. A., Piscunov N. S., Bahvalov E. D., Ochukurov V. I. Optimizing nonlinear soil body models for geotechnical conditions of Saint-Petersburg. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(7):148-163. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_148.

Введение

В настоящее время при строительстве, реконструкции и эксплуатации широко используются методы численного моделирования, позволяющие прогнозировать напряженно-деформированное состояние (НДС) грунта [1 – 4]. Численное моделирование проводится на основе программных комплексов ANSYS, ABAQUS, Midas, ZSoil и др., реализующих конечно-элементный (КЭ) метод расчета.

Любой программный продукт, реализующий КЭ требует модельного описания поведения грунтового массива [5]. На выбор модели влияет ряд условий, в основном это — ключевые особенности физико-механического поведения грунта; виды напряженного состояния и траектории напряжений, которые может испытывать грунт в процессе строительства; темпы строительства; необходимость выполнения достоверных геотехнических расчетов и прогнозов, что обычно связано с ответственностью зданий, экономическим фактором и наличием конкретных указаний в техническом задании [6].

Для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга наибольшее распространение получили упруго-пластические модели типа Hardening Soil (HS, HSs, GHS) и Soft Soil (SS, SSC) и их модификации.

Задача корректного определения входных параметров таких моделей имеет первостепенную важность для наиболее адекватного отражения работы оснований зданий и сооружений. При неверном определении параметров из данных ИГИ возникает риск их неправильной интерпретации и невозможности применения построенной геомеханической модели [7]. Вдобавок, разработчики Plaxis отмечают, что вид математических формулировок моделей формировался под определенную эмпирическую выборку, следовательно, необходимо корректировать лабораторные данные перед заданием параметров модели грунта.

В.А. Васенин [8] показал, что для геологических условий Санкт-Петербурга из-за отсутствия регламентированной классификации отбираемых образцов по их качеству (не считая классификации по внешнему виду) полученные в лабо-

ратории зависимости могут иметь искаженный характер и без корректировки не отражают реального поведения геоматериала, необходимого для достоверного геотехнического расчета, от которого впоследствии будет зависеть ход строительства и эксплуатации [9]. Вдобавок к этому, извлекаемый с глубин керн в процессе подъема теряет свойства породы, заключенной в массиве [10].

Предлагаемая методика получения коэффициента переуплотнения в инженерно-геологических условиях г. Санкт-Петербурга [11, 12] сопоставляется с методикой Р. Майне [13] определения коэффициента переуплотнения по испытаниям статического зондирования, а также по лабораторным испытаниям по методике А. Casagrande [14].

Обзор литературы

Котечественным исследователям, которые первыми занимались вопросами получения и калибровки входных параметров зарубежных нелинейных моделей грунта следует отнести А.Г. Шашкина [15] и др. Особенности предложений перечисленных авторов является адаптация зарубежных подходов к отечест-

венным практикам и нормам. Методика оптимизации параметров модели HS была описана в [16]. Применительно к программному продукту Plaxis, благодаря обширно представленной информации самих разработчиков [17] сделан прорыв в вопросах получения входных параметров нелинейных моделей.

Однако по-прежнему требуется подтверждение возможности применения эмпирических зависимостей для определения физико-механических характеристик грунта по данным полевых испытаний, предлагаемые зарубежными авторами для инженерно-геологических условий г. Санкт-Петербург, которое отчасти приводится в настоящей работе.

Методы и материалы

Рассматривается методика моделирования грунтового основания, которая базируется на решении задачи создания численной модели грунтового массива, состоящего из расчетных геологических элементов (РГЭ). Для каждого РГЭ назначается модель поведения, входные параметры которой определяются лабораторными испытаниями, а затем уточняются по данным полевых испытаний.

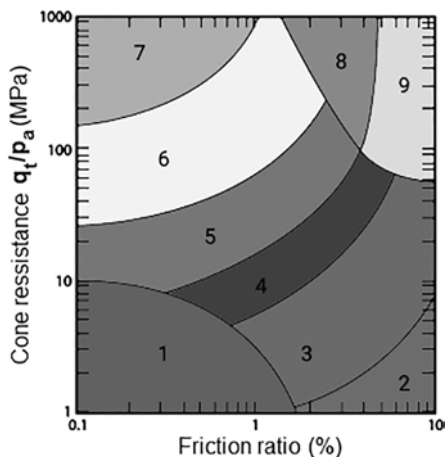


Рис. 1. Классификация грунтов по методу Robertson, 2010 [20]

Fig. 1. Robertson's soil classification, 2010 [20]

Таблица 1

Классификация грунтов по методу Robertson [20]
Robertson's soil classification [20]

Область	Тип грунта (SBT)
1	Чувствительный тонкодисперсный грунт
2	Органические грунты — глины
3	Глины — илистая глина, глины
4	Суглинок — глинистый ил, илистая глина
5	Песчаная смесь — илистый песок, песчаный ил
6	Пески — чистый песок, илистый песок
7	Гравелистый песок, плотный песок
8	Очень твердый песок, глинистый песок
9	Очень твердый тонкодисперсный грунт

Глуб. под.	Абс. отм.	Мощн. слоя	Литолог. разрез	Описание грунтов
0.5	6.2	0.5		Бетонная плита
				Насыпные грунты
1.8	4.9	1.3	1	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные
3.7	3.0	1.9	3	Суглинки легкие пылеватые текучепластичные
7.1	-0.4	3.4	4	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные
8.8	-2.1	1.7	5	Суглинки легкие пылеватые полутвердые с гравием
11.7	-5.0	2.9	6	Пески пылеватые плотные
12.3	-5.6	0.6	7.1	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные
14.9	-8.2	2.6	5	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные
16.5	-9.8	1.6	7	Суглинки легкие пылеватые твердые
18.0	-11.3	1.5	6	Суглинки легкие пылеватые
21.5	-14.8	3.5	8	Глины пылеватые твердые
29.2	-22.5	7.7	9	Глины пылеватые твердые слоистые
30.0	-23.3	0.8	10	Глины пылеватые твердые слоистые

Рис. 2. Геологический разрез рассматриваемой скважины, составлено авторами

Fig. 2. Authorial geological section of borehole

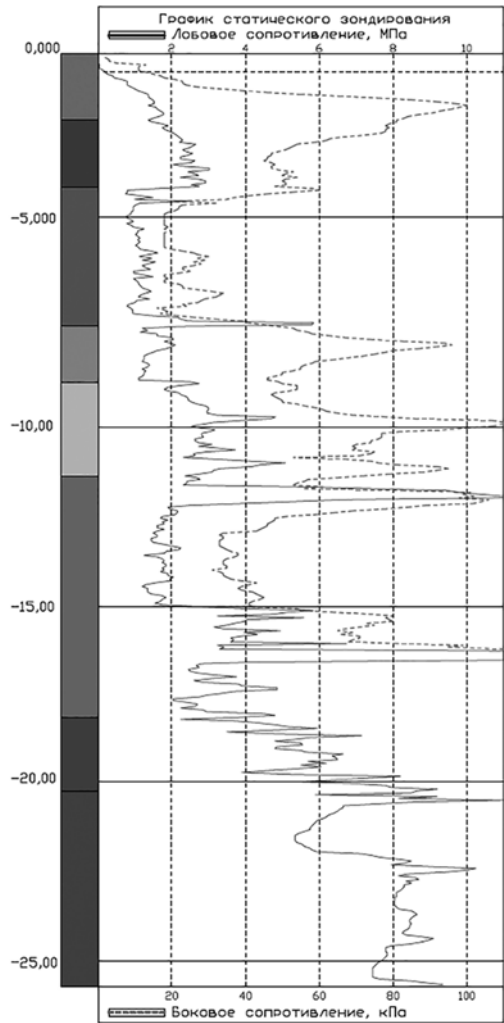


Рис. 3. Модель, построенная в программном комплексе PLAXIS по результатам статического зондирования при минимальной толщине слоя 1,3 м, составлено авторами

Fig. 3. Authorial PLAXIS model based on static probing data at minimum layer thickness of 1.3 m

Моделирование геологического разреза и природного напряженного состояния массива

Для описания методики оптимизации параметров модели упрочняющегося грунта, приведенной ниже, использовался программный комплекс PLAXIS версии 2020.

Исходные материалы (инженерно-геологические изыскания) взяты с проектируемого объекта в г. Санкт-Петербурге, в районе станции Международная [18, 19].

Моделируемый массив грунта включает 10 инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (см. рис. 2). Каждому ИГЭ соответствует один или несколько РГЭ, для которых определялись входные параметры.

Геологический разрез можно оперативно смоделировать с помощью программного комплекса PLAXIS по данным статического зондирования и загрузкой величин лобового сопротивления — q_c , бокового сопротивления — f_s и порового давления — u во вкладку borehole. После чего PLAXIS разделит массив на слои согласно методике Robertson [20] (см. табл. 1, рис. 1).

В методике Robertson для разделения на ИГЭ за критерий разделения принимается величина отношения суммы лобового сопротивления (см. рис. 3) и порового давления к атмосферному давлению, а также процентное соотношение бокового трения к величине лобового сопротивления. Данная методика рассматривалась в работах Гольдфельда и др. [21].

При моделировании природного напряженного состояния ключевой задачей является определение степени переуплотнения грунта [11 – 13]. В Plaxis степень переуплотнения задается через коэффициент переуплотнения — OCR , или через давление переуплотнения — POP . Таким образом моделируется массив

с автоматическим разбиением на ИГЭ, далее по результатам анализа, в случае низкой вариации физико-механических свойств, а также ввиду очень малой мощности, ряд ИГЭ может быть объединен в РГЭ, для каждого из которых необходимо задать параметры и степень переуплотнения.

В работе проанализированы две методики определения коэффициента переуплотнения (см. рис. 4).

Для применения методики Р. Мауне [13] необходимо определить величины лобового сопротивления природного массива грунта методом статического зондирования — q_c . Затем, используя формулы (1), (2), определить величины давления переуплотнения — POP и коэффициента переуплотнения — OCR .

$$POP = 0,33(q_c - \sigma_{v0}) \quad (1)$$

$$OCR = \frac{POP}{\sigma_{v0}} + 1 \quad (2)$$

Коэффициент переуплотнения грунтов на рассматриваемом участке принимают необоснованно нереалистичные значения для глубин до –4 м от уровня дневной поверхности, что, возможно, связано с руслом ранее существовавшей реки Волковка.

Методика В.А. Васенина [12, 13] оперирует величинами бытового напряжения, коэффициентом пористости — e_{in} и его изменением при достижении уровня бытовых напряжений — Δe . Достоверная реализация методики требует испытания методом компрессионного сжатия большого количества образцов с разной глубины.

Изменение пористости при достижении величины бытового давления позволяет характеризовать структурную нарушенность грунта. В этой связи необходимо оценить степень нарушенности исследуемых грунтов и его влияние на искомые параметры модели.

При определении коэффициента переуплотнения OCR в качестве допущения, изменение коэффициента пористости было принято усредненным по всем образцам рассматриваемого ИГЭ.

Для определения величин OCR использовалось выражение (3).

$$OCR \approx 10^{\frac{1}{2} \left[\frac{1}{0,085 \Delta e + 0,17 e_0 + 0,18} - \lg \sigma_{v0} \right]} \quad (3)$$

Результаты расчета коэффициентов переуплотнения по обоим методикам представлены на рис. 4.

Определение качества образцов

По мнению В.А. Васенина большинство образцов грунта имеют неудовлетворительное качество из-за нарушения природной структуры вследствие несовершенства приборов и неиспользования грунтоносов для отбора образцов грунтов [9, 12].

Для подтверждения данного утверждения была выполнена оценка качества восьми ИГЭ по методикам [22, 23].

В методике [22] критерием-оценкой качества образца грунта принята объемная деформация и ее изменение при достижении природного напряжения. По степени качества образцы делятся на 5 категорий.

Методика оценки качества образца грунта [23] базируется на величине коэффициента пористости образца и его изменения при достижении природного напряжения, а также коэффициента переуплотнения OCR .

Результаты определения качества образцов согласно методикам [22, 23], с учетом ранее определенного коэффициента переуплотнения приведены в табл. 2 и на рис. 5, 6.

Анализ результатов показывает, что подавляющее большинство образцов имеют рейтинг качества «Очень плохое» по методике Т. Lunne, а по методике К. Terzaghi практически все образцы имеют рейтинг качества D или C.

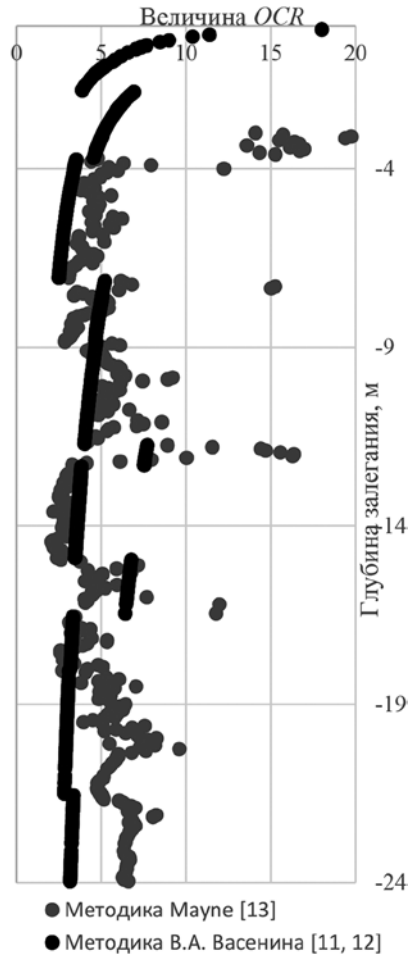


Рис. 4. Величины OCR , определенные по двум методикам, составлено авторами.

Fig. 4. Authorial values OCR from two procedures

Полученные результаты соответствуют утверждению В.А. Васенина [8], других исследователей о низком качестве образцов, отбираемых на территории Санкт-Петербурга и ЛО.

Корректировка компрессионной кривой

Еще одним направлением определения параметров нелинейных моделей по образцам грунта с нарушенной структурой является коррекция деградировавших диаграмм деформирования компрессионных испытаний. Наиболее коррект-

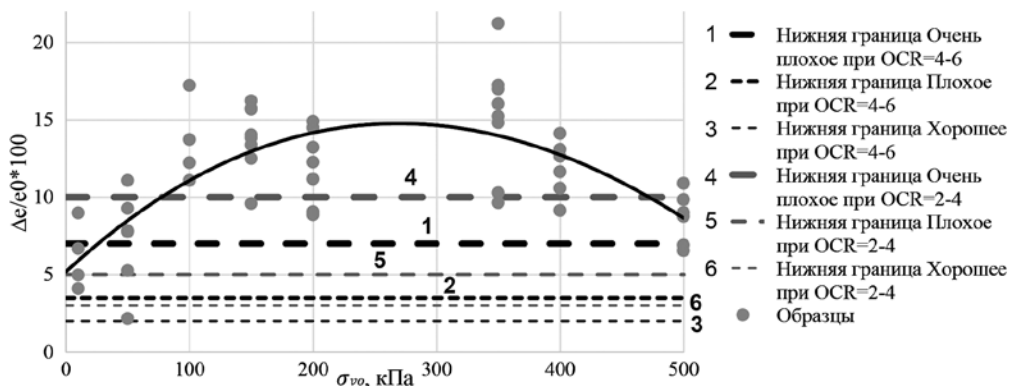


Рис. 5. График зависимости изменения индекса качества образцов, найденного по методике Т. Lunne и др. [23], от величины бытового давления, составлено авторами

Fig. 5. Authorial sample quality index found according to T. Lunne et al. [23] as function of overlying soil weight

Таблица 2

Градации качества образца по критерию деформации по К. Terzaghi и др. [22], Т. Lunne и др. [23]

Quality ranks of samples by K. Terzaghi et al. [22], T. Lunne et al. [23] principle

Градация качества образца [22]		Критерий [22]			качество образца
объемная деформация, %	качество	OCR = 1–2 $\Delta e/e_0$	OCR = 2–4 $\Delta e/e_0$	OCR = 4–6 $\Delta e/e_0$	
< 1	A	< 0,04	< 0,03	< 0,02	очень хорошее
1–2	B	0,04–0,07	0,03–0,05	0,02–0,035	хорошее
2–4	C	0,07–0,14	0,05–0,1	0,035–0,07	плохое
4–8	D	> 0,14	> 0,1	> 0,07	очень плохое
> 8	E	—	—	—	—

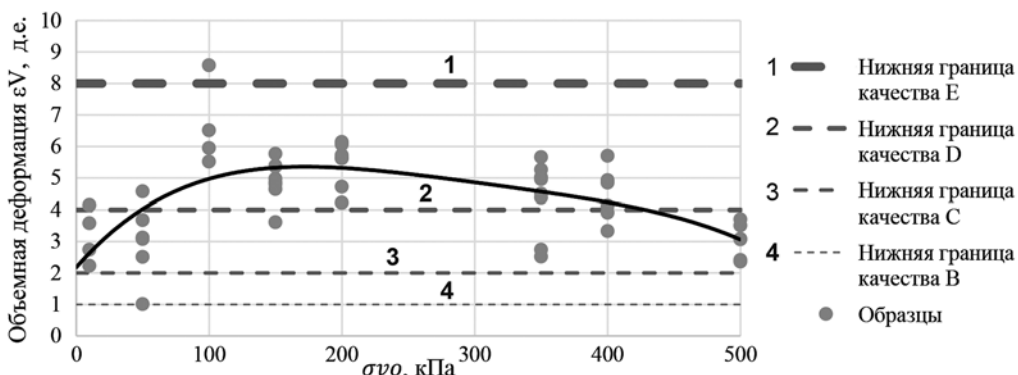


Рис. 6. График зависимости изменения индекса качества образцов, найденного по методике К. Terzaghi и др. [22], от величины бытового давления, составлено авторами

Fig. 6. Authorial sample quality index found according to K. Terzaghi et al. [22] as function of overlying soil

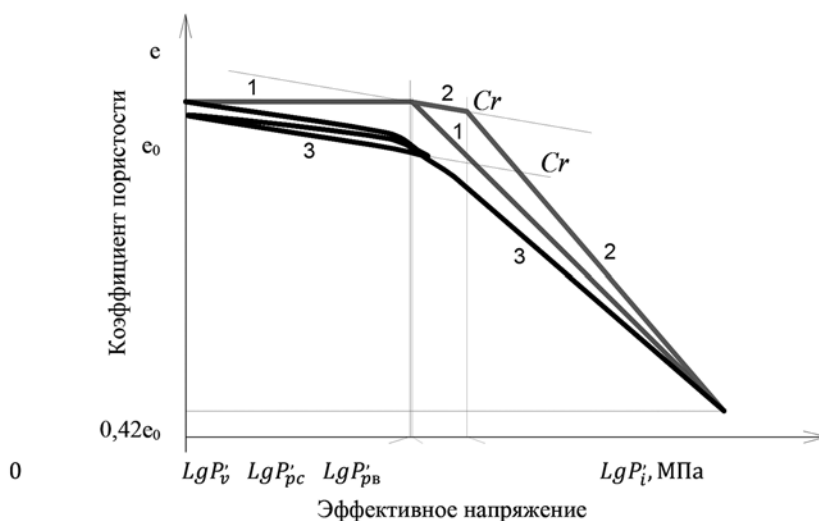


Рис. 7. Пример применения метода А. Casagrande, составлено авторами

Fig. 7. Authorial illustration of Casagrande's method application

ной является методика J.L. Schmertmann [24], позволяющая скорректировать компрессионную кривую.

Сущность методики:

- строится график зависимости изменения коэффициента пористости Δe_0

от вертикальной нагрузки при компрессионных испытаниях $\log P'_i$;

- наносятся вертикальные линии, соответствующие бытовому напряжению грунта $\lg P'_v$ и давлению переплотнения $\lg P'_p$;

Таблица 3

Результаты реализации метода J.L.Schmertmann и сравнения методов В.А. Васенина и А. Casagrande (составлена авторами)
Authorial Schmertmann's method implementation and comparison of Vasenin's and Casagrande's techniques

№ РГЭ	Метод определения давления переплотнения	Индекс компрессии	Одометрический модуль деформации, E_{oed} , МПа	Отличие от значений, полученных при первичных изысканиях, %
3	Из исходных данных без коррекции	0,808	0,53	0,0
	Метод А. Casagrande	0,839	0,52	3,8
	Метод В.А. Васенина	0,890	0,49	10,1
6	Из исходных данных без коррекции	0,102	3,78	0,0
	Метод А. Casagrande	0,116	3,32	13,7
	Метод В.А. Васенина	0,137	2,81	34,3
9	Из исходных данных без коррекции	0,137	2,55	0,0
	Метод А. Casagrande	0,158	2,18	15,3
	Метод В.А. Васенина	0,162	2,12	18,2

- наносятся горизонтальные линии, соответствующие начальному коэффициенту пористости e_0 и $0,42e_0$;

- строится прямая разгрузки C_r и проецируется на пересечение прямых e_0 и $\lg P'_{v_0}$;

- из точки пересечения C_r и $\lg P'_{v_0}$ проводится прямая до точки пересечения $0,42e_0$ с кривой нагрузки компрессионного испытания. Тангенс угла наклона данной прямой является скорректированным индексом компрессии (C_c).

Сложность состоит в задании давления переуплотнения. Существующие методы определения данного параметра дают существенный разброс значений [24]. Согласно рекомендациям [11] величину давления переуплотнения следует определять по методу А. Casagrande [14]. Реализация требований ГОСТ Р 58326-2018 практически невозможна из-за требований, предъявляемых к выделению характерного излома на компрессионных кривых. Было принято решение определять давление переуплотнения ($\lg P'_{pc}$) методом А. Casagrande и методом В.А. Васенина ($\lg P'_{pb}$) [12] с последующей их оценкой (см. рис. 7, табл. 3).

В методе J.L. Schmertmann не указывается размерность (Па, КПа, МПа) вертикальной нагрузки. Сравнение показало, что метод работает вне зависимости от размерности, так как максимальная разница индекса компрессии составила менее 5%, что можно отнести к погрешности расчета.

Определение и калибровка входных параметров модели Hardening Soil

Процесс оптимизации (калибровки) параметров модели грунта (parameter optimization) заключается в их изменении программным комплексом PLAXIS (модуль SoilTest) выбранных параметров модели грунта таким образом, что-

бы результаты виртуальных испытаний модели были адекватны результатам лабораторных испытаний.

В рассматриваемой геотехнической задаче для модели Hardening Soil ключевую роль играют лабораторные данные по компрессионным и трехосным испытаниям (ТХТ).

ТХТ проводились при различных величинах бокового давления. В процессе калибровки следует ориентироваться на результаты испытаний, в которых значение бокового обжатия приблизительно равно значению бокового давления в природном массиве.

Для процесса калибровки компрессионных испытаний использовались усредненные результаты лабораторных испытаний.

Процесс оптимизации включает следующие последовательные этапы:

1. Аналитическая обработка результатов лабораторных испытаний; графическое построение предварительных зависимостей для оценки сходимости математических зависимостей модели с результатами лабораторных испытаний. В качестве материала для аналитической обработки следует использовать зависимости, показывающие качественно схожее поведение в пределах одного РГЭ при различных величинах бокового обжатия, также, стоит исключать кривые выбивающиеся из общего тренда.

2. Обработанные результаты испытаний будут представлять значения вертикальных деформаций ε_{yy} в зависимости от интенсивности касательных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$) в формате txt.

3. В Plaxis моделируется материал с параметрами этапа 1. Далее в модуле SoilTest выбирается функция «parameter optimization», являющаяся основой для калибровки. Во вкладке «select parameters» выбираются диапазоны калибруемых параметров, во вкладке «select curves» загружаются компрессионные кри-

Name	Min value	Value	Max value	Units	Optimal	Sensitivity
<input checked="" type="checkbox"/> E_{50}^{ref}	10,00E3	10,00E3	15,00E3	kN/m ²	10,88E3	58,8 %
<input type="checkbox"/> E_{oed}^{ref}		11,96E3		kN/m ²	11,96E3	0,00 %
<input type="checkbox"/> E_{ur}^{ref}		30,12E3		kN/m ²	30,12E3	0,00 %
<input checked="" type="checkbox"/> power (m)	0,5000	0,8000	1,000		0,5064	100 %
<input type="checkbox"/> V_{ur}		0,2000			0,2000	0,00 %
<input type="checkbox"/> K_{0nc}		0,4254			0,4254	0,00 %
<input type="checkbox"/> P_{nref}	100,0			kN/m ²	100,0	0,00 %
<input type="checkbox"/> C_{ref}		23,00		kN/m ²	23,00	0,00 %
<input type="checkbox"/> ϕ (phi)		32,00		°	32,00	0,00 %
<input type="checkbox"/> ψ (psi)		0,000		°	0,000	0,00 %
<input checked="" type="checkbox"/> R_f	0,5000	0,5000	0,9500		0,8607	14,7 %
<input type="checkbox"/> V_{unsat}		17,50		kN/m ³	17,50	0,00 %
<input type="checkbox"/> V_{sat}		21,00		kN/m ³	21,00	0,00 %

Рис. 8. Последовательность калибровки параметров в модуле SoilTest, parameter optimization, составлено авторами

Fig. 8. Authorial sequence of calibration of parameters in module SoilTest, parameter optimization

вые, по которым будет проходить оптимизация (рис. 8).

Калибровка по всем параметрам и кривым одновременно не даст корректных результатов, если не провести предварительной калибровки по отдельно взятым параметрам и по отдельным видам испытаний.

Вначале калибровка ведется только по кривым трехосных испытаний (ТХТ). Прочностные параметры c и ϕ определяются по консолидировано-дренированной схеме трехосных испытаний и могут не калиброваться или их изменение задается в узком диапазоне. Калибровка и значительное изменение c и ϕ приводит к существенному расхождению между предельной огибающей Кулона-Мора, полученной по результатам моделирования и лабораторных испытаний.

Для начальной калибровки рекомендуется выбрать значения E_{50}^{ref} , m и R_f и задать их в максимально широком диапазоне. Далее, сохранив полученные данные, повторить операцию, уменьшив диапазон значений. При необходимости уточнить значения E_{oed}^{ref} и K_{0nc} .

Затем калибруется одометрический модуль деформации — E_{oed}^{ref} по усредненным компрессионным испытаниями (без разгрузки) и, далее отдельно, мо-

дуль деформации при разгрузки — E_{ur}^{ref} по усредненной ветви разгрузки. Если калибровка с учетом принятых ранее параметров m и R_f не позволяла достоверно (relative error > 35%) описать усредненные результаты компрессионных испытаний, то использовалась модель GHS (Generalized Hardening Soil) или уточнялись величины переуплотнения грунта в виртуальном эксперименте.

Далее калибровка повторялась одновременно по ТХТ и одометрическим испытаниям. Параметры E_{50}^{ref} и E_{oed}^{ref} задавались в узком диапазоне. В случае слабой сходимости (relative error > 35%) вновь подбирались R_f , m . Как правило, удавалось добиться высокой визуальной и аналитической сходимости (relative error < 30%, чаще ниже 20%).

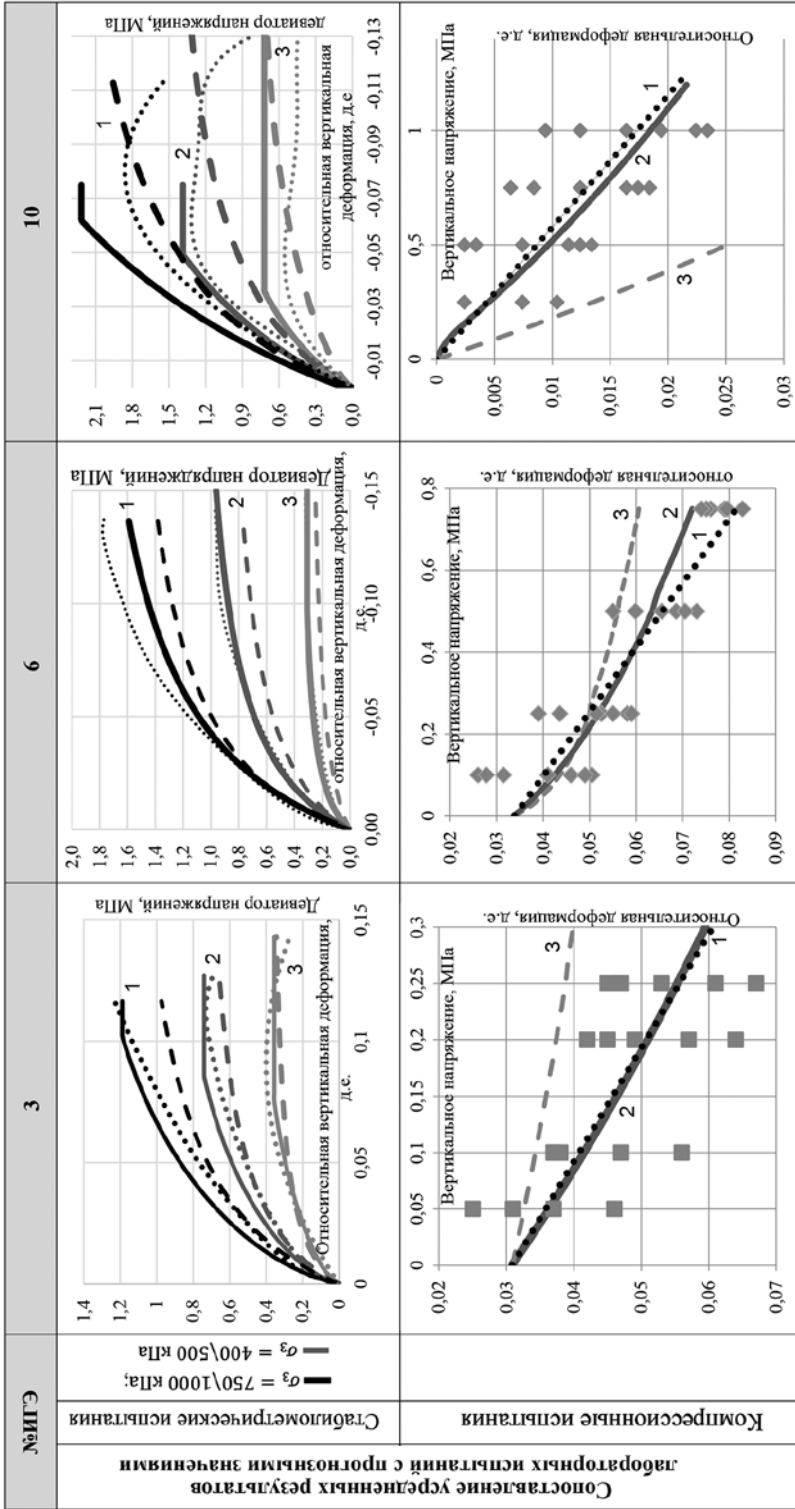
Результаты оптимизации трех ИГЭ без учета результатов разгрузки представлены в табл. 4.

Обсуждение результатов калибровки

В табл. 4 представлены результаты калибровки параметров модели HS. Для компрессионных испытаний: цифрой 1 обозначены кривые, полученные при испытании образцов, 3 — результаты виртуальных испытаний модели с значениями параметров после аналитиче-

Таблица 4

Результаты калибровки параметров грунтов с помощью программы Soil Test (составлена авторами)
 Authorial calibrated parameters of soil using Soil Test



Пунктиром показаны результаты лабораторных испытаний; сплошной линией – результат калибровки.

ской обработки, 2 — результаты испытаний после калибровки.

Для стабилметрических испытаний точками обозначены результаты лабораторных испытаний, пунктирной линией — результаты виртуальных испытаний модели с значениями параметров после аналитической обработки, сплошной — результаты испытаний после калибровки.

Как следует из результатов калибровки одометрических испытаний, функция «parameter optimization» существенно повышает точность описания поведения грунтов по сравнению с описаниями полученными традиционными методами.

Точность описания поведения образцов при ТХТ удалось повысить на 5–20%, в зависимости от типа грунта, по отношению к величинам, полученным без использования инструмента «parameter optimization».

Калибровка результатов лабораторных испытаний образцов грунтов позволяет сделать следующие выводы:

- при малом значении секущего модуля деформации E_{50}^{ref} коэффициент разрушения R_f оказывает меньшее влияние, так как предел прочности Кулона-Мора достигается позже. Значение предела прочности остается неизменным;
- при одометрических испытаниях изменение секущего модуля деформации E_{50}^{ref} не вызывает существенного изменения в поведении грунта;
- при проведении ТХТ увеличение одометрического модуля деформации E_{oed}^{ref} вызывает малое увеличение начального угла наклона в осях вертикальных деформаций ε_{yy} и девиаторной нагрузки $|\sigma_1 - \sigma_3|$, а также более плавное изменение секущего модуля деформации E_{50} при увеличении вертикальной нагрузки;
- при одометрических испытаниях увеличение одометрического модуля деформаций E_{oed}^{ref} вызывает значительное увеличение начального угла кривой де-

формирования в координатах «вертикальная деформация ε_{yy} — напряжения σ_{yy} »;

- при одометрических испытаниях увеличение модуля разгрузки и повторного нагружения E_{ur}^{ref} увеличивает угол наклона кривой деформирования при разгрузке, существенно увеличивая остаточные деформации разгруженного образца;

- увеличение степенного показателя жесткости m незначительно влияет на результаты ТХТ с низким значением бокового обжатия. При высоких значениях бокового давления увеличение показателя m приводит к увеличению угла кривой деформирования в осях вертикальных деформаций ε_{yy} и девиаторной нагрузки $|\sigma_1 - \sigma_3|$; увеличение коэффициента разрушения R_f не повлияло на результаты одометрических испытаний, при ТХТ вызвало увеличение скорости выполаживания графиков, не изменяя положение площадки текучести на девиаторной оси.

Выводы

Тезисы проведенных исследований:

- анализ результатов ИГИ показал, что по всем ИГЭ большинство образцов грунта имеют нарушенную природную структуру и высокий коэффициент переуплотнения;
- анализ результатов нескольких методов определения коэффициента переуплотнения, показал схожее распределение величин давления переуплотнения по глубине, что свидетельствует о возможной применимости методик В.А. Васенина [8] и Р. Мауне [13] для инженерно-геологических условия г. Санкт-Петербурга;
- для получения входных параметров нелинейных моделей и их дополнительной калибровке с помощью «parameter optimization» в SoilTest Plaxis результаты лабораторных испытаний грун-

тов на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области должны подвергаться первичной обработке и корректировке;

- для корректного определения входных параметров нелинейных моделей нормативную документацию проведения лабораторных испытаний необходимо дополнить требованиями к качеству образцов грунта и способами восстановления деградировавших диаграмм деформирования, при испытаниях образцов нарушенной структуры;

- величина модуля деформации объемной жесткости $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ значительно отличается при его определении по исходным диаграммам деформирования образцов с нарушенной структурой и по восстановленным; данное отличие увеличивается при увеличении глубины отбора;

- предложена методика оптимизации входных параметров, позволяющая получить достоверное описание моделью результатов ГХТ и компрессионных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутепов Ю. Ю., Боргер Е. Б. Численное моделирование процесса сдвижения породных массивов применительно к горно-геологическим условиям шахты имени Рубана в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 5. — С. 66–75.

2. Карасев М. А., Буслова М. А., Вильнер М. А., Нуген Т. Т. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола на участке сопряжения с горизонтальной выработкой в соляных породах // Записки Горного института. — 2019. — Т. 240. — С. 628–637. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.628.

3. Протосеня А. Г., Вербило П. Э. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива // Записки Горного института. — 2017. — Т. 223. — С. 51–57. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51.

4. Komolov V., Belikov A., Demenkov P. Research on load-bearing constructions behavior during pit excavation under «Slurry Wall» protection // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022, vol. 180, pp. 313–323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_29.

5. Игнатъев С. А., Сударииков А. Е., Имашев А. Ж. Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок // Записки Горного института. — 2019. — Т. 238. — С. 371–375. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371.

6. Деменков П. А., Голдобина Л. А., Трушко О. В. Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» // Записки Горного института. — 2018. — Т. 233. — С. 480–486. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.480.

7. Bringreave R. B. J. Automated model and parameter selection: incorporating expert input into geotechnical analyses // Geostrata. 2019, vol. 23, no. 1, pp. 38–45. URL: http://www.readgeo.com/geostrata/jan_feb_2019/MobilePagedArticle.action?articleId=1455782#articleId1455782.

8. Васенин В. А. Статистическая оценка параметров нарушения природной структуры лабораторных образцов глинистых отложений при инженерно-геологических изысканиях на территории Санкт-Петербурга и окрестностей // Инженерная геология. — 2018. — Т. 13. — № 6. — С. 48–65. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65.

9. Protosenya A. G., Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A. Geomechanics of low-subsidence construction during the development space in large cities and megalopolises // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2019, vol. 9, no. 5, pp. 1005–1014.

10. Грищенко А. И., Семенов А. С., Мельников Б. Е. Моделирование процессов деформирования и разрушения керна при его извлечении с больших глубин // Записки Горного института. — 2021. — Т. 248. — С. 243–252. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.8.

11. Васенин В. А. Метод определения давления переуплотнения на основе статистических зависимостей распределения индекса компрессии. Ч. 1. Обоснование метода // Инженерная геология. — 2019. — Т. 14. — № 3. — С. 37–57. DOI: 10.25296/1993-5056-2019-14-3-37-57.

12. Васенин В. А. Метод определения давления переуплотнения на основе статистических зависимостей распределения индекса компрессии. Ч. 2. Особенности работы метода // Инженерная геология. — 2019. — Т. 14. — № 4. — С. 24–42. DOI: 10.25296/1993-5056-2019-14-4-24-42.

13. Mayne P. W., Coop M. R., Springman S. M., Huang A., Zornberg J. G. Geomaterial behavior and testing / Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. vol. 4, 2009, pp. 2777–2872. DOI: 10.3233/978-1-60750-031-5-2777.

14. ГОСТ Р-58326-2018. Грунты. Методы лабораторного определения параметров переуплотнения. 01.06.2019.

15. Шашкин А. Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта // Развитие городов и геотехническое строительство. — 2011. — № 2. — С. 1–32.

16. Алексеев А. В., Иовлев Г. А. Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 75–87. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87.

17. Brinkgreve R. B. J., Engin E., Swolfs W. M. Plaxis 2D manual. Rotterdam, Netherlands, Balkema, 2017, 816 p.

18. Деменков П. А., Трушко О. В., Комолов В. В. Прогноз оседания поверхности земли при сооружении котлована вблизи застройки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2019. — № 2. — С. 300–309.


19. Smirnova O. M. Rheologically active microfillers for precast concrete // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018, vol. 9, no. 8, pp. 1724–1732.

20. Robertson P. K., Cabal K. L. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. 6th edition, Gregg Drilling & Testing Inc., USA, 2015, 143 p.

21. Гольдфельд И. З. Практика расширенного анализа результатов полевых испытаний грунтов сваями и зондированием // Геотехника. — 2013. — № 3. — С. 48–66.

22. Terzaghi K., Peck R. B. Mesri G. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, New York, 1996, 592 p.

23. Lunne T., Berre T., Strandvik S. Sample disturbance effect in soft low plasticity Norwegian clay / Proceedings of the Conference on Recent Developments in Soil Mechanics. Rio-de-Janeiro, 1997, pp. 81–102.

24. Yanhouide J. A. G. Consolidation parameters for embankment settlement on soft clay soils in Houston area, 2007. DOI: 10.13140/RG.2.1.2417.6728. 

REFERENCES

1. Kutepov Yu. Yu., Borger E. B. Numerical modeling of the rock mass subsidence applied to geological conditions of the mine named after Ruban in Kuzbass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 5, pp. 66–75. [In Russ].

2. Karasev M. A., Buslova M. A., Vilner M. A., Nguyen T. T. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks. *Journal of Mining Institute.* 2019, vol. 240, pp. 628–637. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.628.

3. Protosenya A. G., Verbilo P. E. Studying the compressive strength of a fractured mountain massif. *Journal of Mining Institute.* 2017, vol. 223, pp. 51–57. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51.

4. Komolov V., Belikov A., Demenkov P. Research on load-bearing constructions behavior during pit excavation under «Slurry Wall» protection. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022, vol. 180, pp. 313 – 323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_29.

5. Ignatiev S. A., Sudarikov A. E., Imashev A. Z. Modern mathematical methods for predicting conditions for maintaining and securing mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 238, pp. 371 – 375. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371.

6. Demenkov P. A., Goldobina L. A., Trushko O. V. Method of forecasting the deformation of the Earth's surface during the construction of pits in conditions of dense urban development using the method «wall in the ground». *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 233, pp. 480 – 486. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.480.

7. Bringreave R. B. J. Automated model and parameter selection: incorporating expert input into geotechnical analyses. *Geostrata*. 2019, vol. 23, no. 1, pp. 38–45, available at: http://www.readgeo.com/geostrata/jan_feb_2019/MobilePagedArticle.action?articleId=1455782#articleId1455782.

8. Vasenin V. A. Evaluation of disturbed parameters of the natural structure of the laboratory samples of clay deposits during engineering and geological surveys in St. Petersburg and the nearest areas. *Inzhenernaya geologiya*. 2018, vol. 13, no. 6, pp. 48 – 65. [In Russ]. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65.

9. Protosenya A. G., Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A. Geomechanics of low-subsidence construction during the development space in large cities and megalopolises. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019, vol. 9, no. 5, pp. 1005–1014.

10. Grishchenko A. I., Semenov A. S., Mel'nikov B. E. Modeling of core deformation and destruction processes during its extraction from great depths. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 248, pp. 243 – 252. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.8.

11. Vasenin V. A. The method of determining the overconsolidation pressure based on the statistical dependencies of the distribution of the compression index. Part 1. Justification of the method. *Inzhenernaya geologiya*. 2019, vol. 14, no. 3, pp. 37 – 57. [In Russ]. DOI: 10.25296/1993-5056-2019-14-3-37-57.

12. Vasenin V. A. The method for determining the overconsolidation pressure based on the statistical dependence of the distribution of the compression index. Part 2. Features of the method. *Inzhenernaya geologiya*. 2019, vol. 14, no. 4, pp. 24 – 42. [In Russ]. DOI: 10.25296/1993-5056-2019-14-4-24-42.

13. Mayne P. W., Coop M. R., Springman S. M., Huang A., Zornberg J. G. Geomaterial behavior and testing. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. vol. 4, 2009, pp. 2777 – 2872. DOI: 10.3233/978-1-60750-031-5-2777.

14. Grunty. *Metody laboratornogo opredeleniya parametrov pereuplotneniya*. GOST R-58326-2018 [Soils. Method of laboratory determination of the parameters of overconsolidation. State Standard R-58326-2018], 01.06.2019. [In Russ].

15. Shashkin A. G. Viscous-elastic-plastic model of clay soil behavior. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2011, no. 2, pp. 1 – 32. [In Russ].

16. Alekseev A. V., Iovlev G. A. Adjustment of hardening soil model to engineering geological conditions of Saint-Petersburg. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 4, pp. 75 – 87. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87.

17. Brinkgreve R. B. J., Engin E., Swolfs W. M. *Plaxis 2D manual*. Rotterdam, Netherlands, Balkema, 2017, 816 p.

18. Demenkov P. A., Trushko O. V., Komolov V. V. Forecast of subsidence of the earth's surface during the construction of a pit near the development. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2019, no. 2, pp. 300 – 309. [In Russ].

19. Smirnova O. M. Rheologically active microfillers for precast concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 8, pp. 1724 – 1732.

20. Robertson P. K., Cabal K. L. *Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering*. 6th edition, Gregg Drilling & Testing Inc., USA, 2015, 143 p.

21. Goldfeld I. Z. Correlation between cone penetration soil test data using the devices of the first and second types. *International Journal Geotechnics*. 2013, no. 3, pp. 48–66. [In Russ].

22. Terzaghi K., Peck R. B. Mesri G. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, New York, 1996, 592 p.

23. Lunne T., Berre T., Strandvik S. Sample disturbance effect in soft low plasticity Norwegian clay. *Proceedings of the Conference on Recent Developments in Soil Mechanics*. Rio-de-Janeiro, 1997, pp. 81–102.

24. Yanhouide J. A. G. *Consolidation parameters for embankment settlement on soft clay soils in Houston area*, 2007. DOI: 10.13140/RG.2.1.2417.6728.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иовлев Григорий Алексеевич¹ — канд. техн. наук,
ассистент кафедры,

e-mail: lovlev_ga@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8615-390X,

Пискунов Никита Сергеевич¹ — студент,

e-mail: piscunov92@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4099-7493,

Бахвалов Евгений Денисович¹ — студент,

e-mail: jenbah@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0190-5605,

Очкуров Валерий Иванович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Ochkurov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3160-3811,

¹ Санкт-Петербургский Горный университет.

Для контактов: Бахвалов Е.Д., e-mail: jenbah@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.A. Iovlev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of Chair,

e-mail: lovlev_ga@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8615-390X,

N.S. Piscunov¹, Student,

e-mail: piscunov92@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4099-7493,

E.D. Bahvalov¹, Student,

e-mail: jenbah@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0190-5605,

V.I. Ochkurov¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor,

e-mail: Ochkurov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3160-3811,

¹ Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: E.D. Bahvalov, e-mail: jenbah@yandex.ru.

Получена редакцией 30.12.2021; получена после рецензии 03.05.2022; принята к печати 10.06.2022.

Received by the editors 30.12.2021; received after the review 03.05.2022; accepted for printing 10.06.2022.